

정지상태 모터의 전류 신호를 이용한 피삭재의 가공면 적응제어

정영훈*(포항공대 대학원 기계공학과), 윤승현(한라공조), 조동우 (포항공대 기계공학과)

Adaptive Control of Machined Surface Using Current of the Feed Motor at Rest

Y. H. Jeong (Mech. Eng. Dept. POSTECH), S.H. Yun (HCC), D. W. Cho (Mech. Eng. Dept. POSTECH)

ABSTRACT

The current from the feed motor of a machine tool contains substantial information about the machining state. There have been many researches that investigated the current as a measure for the cutting forces. However it has not been reported that indirect measurement of the cutting forces from the current of the feed motor at rest is possible. The cutting force normal to the machined surface influences the machined surface of the workpiece, which makes it necessary to estimate this force to control the roughness of the machined surface. But the unpredictable behavior of the current prevents applying the current to prediction of the cutting state. In this paper, empirical approach was conducted to resolve the problem. Also parametric adaptive and fuzzy logic control strategies are applied to the force regulation problem. As a result, the current is shown to be related to the accumulation of the infinitesimal rotation of the motor, and besides the unpredictable behavior of the current is shown to be caused by the relationship. Subsequently the relationship between the current and the cutting force is identified, and it is presented that control of machined surface using the current of the feed motor at rest is possible.

Key Words : AC servo (AC 서보), Machined surface (가공면), Current (전류), Feed motor at rest (정지모터), Adaptive control (적응 제어), Fuzzy logic (퍼지 로직), Cutting force (절삭력), Pulse accumulation (회전량 적분치)

1. 서론

1950년대 수치제어가 공작기계에 도입된 후 CNC는 생산시스템의 전 영역에 빠르게 적용되어 왔다. 그러나 숙련자의 경험적 지식에 의한 절삭조건 설정이나 작동은 생산의 가속화나 무인 자동화에는 문제점으로 지적되어 왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 지능 생산 시스템의 개념을 도입하고자 많은 연구가 진행되고 있다.

절삭력은 가공에 있어 가공성능의 가장 중요한 지표로 볼 수 있다. 이러한 절삭력을 측정하는 센서로 공구동력계가 많이 활용되고 있다. 그러나 공구동력계는 고가이며, 최대 부하 및 스트로크의 제한, 배선 등의 문제로 현장에서의 활용에 많은 제한을 가지고 있다. 이러한 공구동력계의 단점에 비해 모터의 구동전류를 이용하여 절삭력을 추정하는 방법은 비용이 저가이며, 설치의 제약이 없고, 계속적인 모터 및 드라이브 기술의 발전으로 인해 공구동력계를 대체할 센서로 그 관심이 집중되고 있다.

대표적 관련 연구로, Stein 등은 교류 서보 모터로부터 절삭력 유도과정을 고찰하고 절삭력을 추정하였다⁽¹⁾. Altintas⁽³⁾와 J. M. Lee⁽⁴⁾ 등은 공구파손 검출을 위해 이송모터 전류로부터 절삭력을 추정하였다. 김태용 등은 이송모터 전류로부터 절삭력을 추정하여 절삭공정 감시 및 적응제어에 적용하였다⁽⁵⁾.

2차원 가공에서 정지하고 있는 모터의 방향은 가공물의 가공면 방향과 일치하므로 정지상태의 모터 전류는 가공면 방향의 절삭력을 추정하는데 많은 정보를 줄 수 있다. 그러나 정지상태 모터의 전류는 절삭력 추정을 곤란하게 하는 특이한 거동을 몇 가지 가지고 있어서 전류 측정을 통한 절삭력 추정에 대한 현재까지의 타 연구에서는 한번도 수행된 바 없다. 그러나 이송방향 절삭력으로는 가공면의 상태를 추정하기 곤란할 뿐만, 전류를 통한 다축 가공의 감시 제어에서 특이거동으로 인한 감시 실패 등 문제를 가질 소지가 있기 때문에 반드시 규명되어야 할 부분이다.

본 연구에서는 정지상태 모터의 전류의 특이거

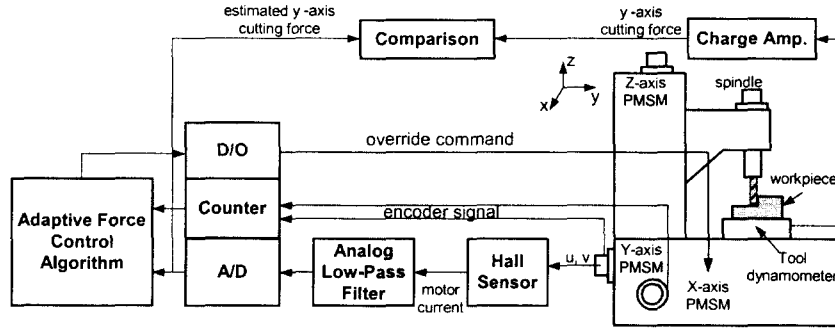


Fig. 1 Experimental setup

동을 조사하고, 가공면 방향의 절삭력 간의 관계를 얻었다. 또한 이를 이용하여 가공면 방향의 절삭력 적응제어에 센서로 이용하였다.

2. 가공면 방향의 절삭력 추정

2.1 실험장치의 구성과 실험 방법

절삭력과 전류의 관계를 얻고 적응제어를 수행하기 위해 실험장치를 구성하였다. 실험을 통해 얻은 신호는 정지하고 있는 가공면 방향의 모터전류, 엔코더 신호, 그리고 절삭력이다.

실험에 사용된 머시닝센터는 FANUC-0MC를 장착한 DAEWOO의 ACE-V30이며, 이송모터는 4극의 PMSM이다. 모터의 엔코더는 카운터 보드에서 10,000 ppr로 4분주하여 회전각을 얻었다. 절삭력과 모터전류는 각각 공기동력계와 홀센서를 이용하여 측정하였으며, AD 보드에서 디지털로 변환하였다. 또한 적응제어를 위해 4비트의 디지털 출력단자를 이용하여 공작기계의 조작반에 이송속도 오버라이드 명령을 전달할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 실험장치의 구성을 보여준다.

절삭력과 전류 간의 관계를 얻기 위한 실험에서는 다양한 주축 회전속도와 반경방향 깊이에 대해 절삭할 때의 전류와 절삭력을 측정하였다. 그리고 적응제어 실험은 가공물의 반경방향 깊이에 변화를 주어 가공조건이 바뀌도록 하였다. 실험에 사용된 절삭공구는 직경 20 mm의 4날 고속도강 평엔드밀이었으며, 가공물의 재료는 AL 2024-T6이었다.

또한 본 연구에서 사용된 모터는 교류전류 모터이기 때문에 DQ 벡터 변환을 이용하여 직류전류로 변환하여 사용하였다⁽⁴⁾.

2.2 정지모터의 특성과 특이 거동

한 축으로 이송하며 가공할 경우 이송방향과는 달리 정지상태에 있는 모터는 속도명령이 '영'이며, 여기에 외란인 절삭력이 작용하기 때문에 이송방향

모터와는 매우 다른 거동과 다양한 패턴을 가진다.

가공면에 일정한 크기의 절삭력을 받을 때 나타나는 전류 레벨의 패턴을 결정짓는 요소는 절삭전의 초기전류와 절삭시의 전류레벨 변화이다. 이로 인하여 발생하는 패턴은 총 네 가지로 그 경우는 Fig. 2와 같다. a 시점 이전의 전류는 0으로 유지되어 있지 않고 임의로 존재하였으며, 절삭 시에는 이 값을 기준으로 변화하였다. 따라서 같은 절삭조건에 대해 초기전류의 위치에 따라 절삭시의 전류레벨이 다르게 나타날 수 있었다. 이로 인하여 매 순간의 전류가 시간지연만큼 이전의 절삭력을 반영하는 이송모터의 경우와는 달리 정지모터의 경우에는 초기전류를 고려해야 한다.

정지모터의 전류는 동적 거동에서도 두 가지의 패턴을 가졌다. Fig. 3은 정상상태 절삭에서의 전류 거동을 보여준다. 이러한 패턴이 생기는 원인은 엔코더 신호로부터 확인할 수 있었다. 모터의 미소한 회전이 활발한 경우에는 (a)의 형태를 가지며 절삭력 파형과 같은 형태이다. 그러나 모터가 간헐적으로 회전하는 경우는 (b)의 형태를 가졌다. 본 연구에서는 이들의 최대값 대신 평균값을 지표로 삼음으로써 이러한 문제를 해결하였다.

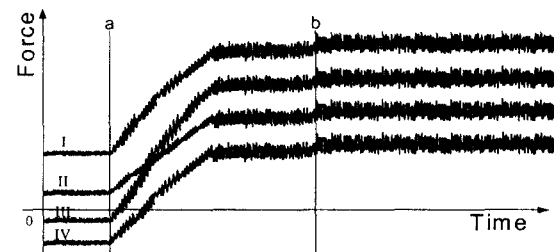


Fig. 2 Patterns of the current level in the cross-feed direction

a : The moment when cutter engages

b : The moment when cutting state is stabilized

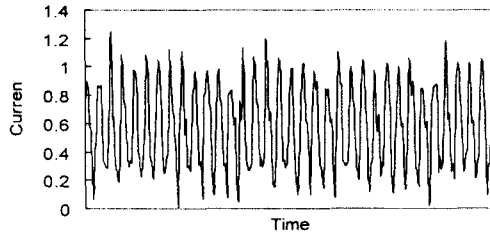


Fig. 3(a) Case I : The current from the motor at rest is similar in behavior to the cutting force

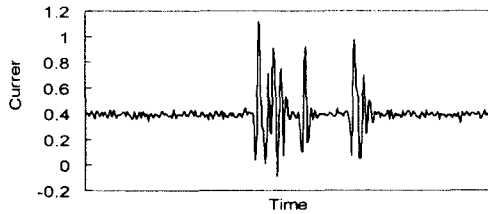


Fig. 3(b) Case II : The current from the motor at rest intermittently shoots

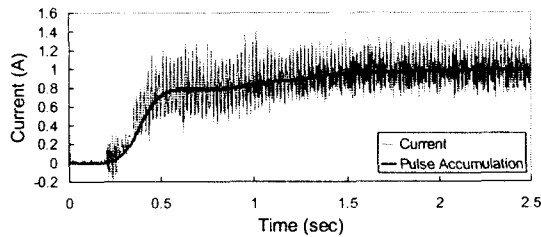


Fig. 4 Current behavior of the motor at rest and the pulse accumulation of the encoder of the motor

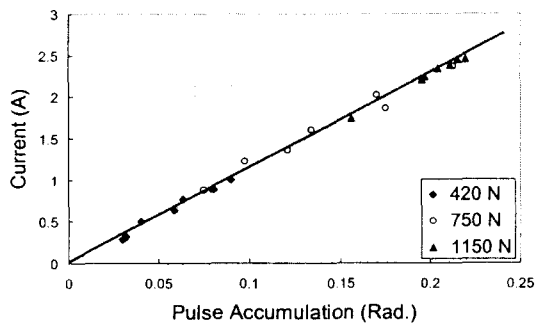


Fig. 5 Relationship between the current and the pulse accumulation for the cutting forces with the same frequency (50 Hz) and the different magnitude

2.2.1 정지모터 전류와 모터의 미소회전

정지상태로 제어되고 있는 모터의 거동을 살펴 보면, 외란으로 인하여 모터가 회전하게 될 경우 이를 원위치로 제어하며 그때의 전류는 다음의 모

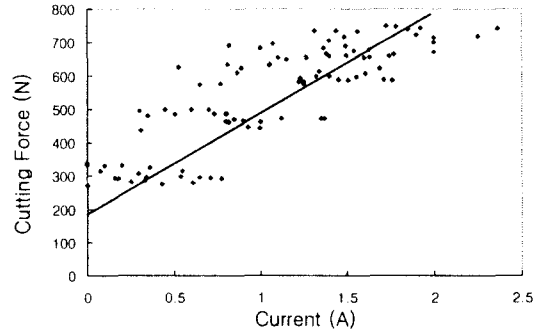


Fig. 6 Relationship between the current from the motor at rest and the cutting force

터회전이 있을 때까지 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 모터 회전량의 적분치로부터 적분구간동안의 전류의 변화량을 알 수 있음을 의미한다.

Fig. 4 는 정지상태 모터의 전류와 회전자 위치의 적분치를 나타낸 것으로, 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다. 이로부터 전류와 모터 회전량의 적분치의 관계를 조사한 결과 이들 사이에는 선형성을 가지고 있었으나 주파수에 따라 선형계수가 서로 다를 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 5 는 이물림 주파수 50 Hz 일 때의 절삭력의 크기와 전류간의 관계이다. 이로부터 같은 조건의 절삭력에 대해서도 서로 다른 회전이 있을 수 있음을 볼 수 있다. 이는 정지모터 전류의 특이 거동이 발생하는 원리를 잘 보여 준다. 이러한 결과는 엔코더의 낮은 분해능과 이송계의 강성 등에서 그 원인을 찾을 수 있다.

2.3 정지모터 전류와 가공면 방향의 절삭력

Fig. 6 은 전류와 절삭력 간의 관계를 보여준다. 이로부터 전류와 절삭력이 선형적으로 비례함을 볼 수 있지만, 오차가 매우 클 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 전류와 절삭력을 1 차 식으로 근사하여 전류로부터 절삭력을 추정하였으나 추정 오차가 최대 200 N 까지 나타날 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 오차는 엔코더의 분해능이 높아짐에 따라 해결 될 수 있을 것으로 예상된다.

3. 정지모터 전류를 이용한 가공면 적응제어

3.1 적응제어 전략

피지 제어의 경우 복잡한 절삭공정의 분석과 서보 이송계의 모델링 없이 경험에 의해 얻어진 몇 개의 언어적인 규칙을 사용하여 성공적인 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서 설계된 피지제어기의 입력값은 기준 절삭력과 실제 절삭력의 차이인 절삭력 오차와 한 단계 이전의 절삭력과 현 단계의 절삭력 차이인

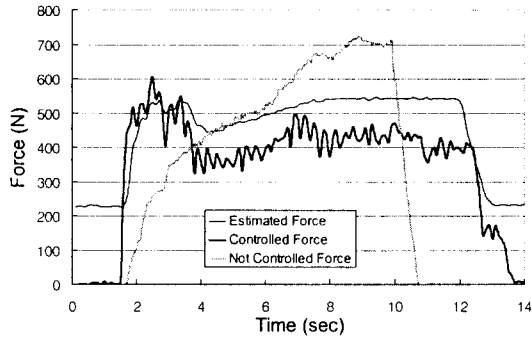


Fig. 7 Comparison among the controlled cutting force, not controlled cutting force and estimated cutting force

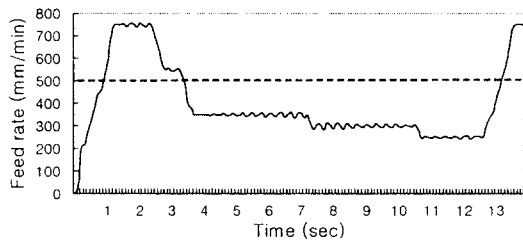


Fig. 8 Comparison of feed rates

절삭력 변화량으로 하였으며, 출력값은 서보 이송계의 속도 명령으로 하였다.

퍼지제어의 입력값과 출력값은 모두 -1 에서 1 사이의 값이므로 스케일링한다. 특히 본 연구에서는 다양한 절삭조건에 대해서 스케일링 인수들을 다시 결정해 주어야 하는 불편함을 없애기 위해 스케일링 인수의 실시간 변경을 적용하였다⁽⁹⁾. 이는 절삭력의 오차가 50 N 이하로 작아졌을 때는 좀 더 넓은 포화(saturation)조건을 주어 기준 절삭력 근처에서 불안정해지는 것을 방지하도록 하였다.

본 연구에서 사용한 퍼지 부분 집합의 소속도 함수는 삼각형 형태(Triangle membership function)이었으며, 연구 [5]에서 경험의 의거하여 제시한 퍼지룰을 사용하고, 무게 중심법을 사용하여 퍼지관계에서 구해진 값을 일반적인 집합으로 바꾸었다.

3.2 가공면 방향 절삭력의 적응제어 실험

적응제어에 사용될 가공조건은 반경방향 깊이가 0 mm 에서 20 mm 까지 선형적으로 변하며, 주축의 회전 속도는 400 rpm 이었다. 기준 이송속도와 기준 절삭력은 500 mm/min, 500 N 으로 설정하였다.

Fig. 7 은 제어된 절삭력을 보여주며, Fig. 8 은 이때의 제어 출력인 이송속도를 보여준다. Fig. 7 로부터 제어된 절삭력의 기준 절삭력에 대한 오차는 최대 150 N 임을 알 수 있고, 제어되지 않은 경우와

비교하여 기준 절삭력에 근접하여 유지되고 있음을 확인 할 수 있다. 또한 절삭부하가 연속적으로 증가하였지만 제어된 이송속도는 계단 형태를 취하고 있다. 이는 퍼지 제어기의 포화조건이 의한 것임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 정지 상태에 있는 모터의 전류로부터 가공면 방향의 절삭력을 추정하였다. 또한 추정된 가공면 방향 절삭력을 다양한 절삭조건에 적용이 가능한 퍼지 제어기법을 이용하여 일정하게 제어할 수 있음을 보였다.

기존의 연구가 이송방향의 전류에 한정되어 이송방향 절삭력만을 추정하여 가공시간 단축에 활용할 수 있었음에 반해 본 연구에서 제시한 가공면 방향의 절삭력 추정방법은 가공물의 품질 향상을 도모할 수 있다. 또한 앞으로 이송방향과 가공면 방향의 절삭력을 동시에 고려함으로써 더욱 효과적인 가공성능을 이룰 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구과제(1999-2-31500-002-3)의 연구비 지원에 의한 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. J. L. Stein, C. -H. Wang, "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp 239-248, 1990
2. Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," J. Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 386-392, 1992.
3. J. M. Lee, D. K. Choi, J. Kim, C. N. Chu, "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process," Annals of the CIRP, Vol. 44/1, pp. 59-62, 1995.
4. 김태용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류 감시를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용", 한국정밀공학회지, 제 13 권 제 2 호, pp. 133-145, 1996.
5. Y. S, Tarn and S. T. Cheng, "Fuzzy Control of Feed Rate in End Milling Operations," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 33, No. 4, pp. 643-650, 1993.